

**В.В. Матвєєнко, асп., В.О. Пильов, д-р техн. наук,  
М.В. Прокопенко, канд. техн. наук, І.Г. Пожидаєв, студ.**

### ПОПЕРЕДНЯ ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ПОРШНЯ З УРАХУВАННЯМ НЕРІВНОМІРНОГО ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ В ЗОНІ ВЕРХНЬОГО КІЛЬЦЯ

Задача розрахункового дослідження теплонапруженого стану деталей камери згоряння (КЗ), зокрема поршнів, на стадії їх проектування має велике значення. Це пояснюється суттєвим зростанням теплових та механічних навантажень на ці деталі внаслідок постійного збільшення рівня форсування двигунів, а також необхідністю переходу до концепції роботи деталей на межі міцності. Для вирішення вказаної задачі застосовують метод скінчених елементів, а в якості граничних умов (ГУ), як правило, використовують ГУ 3-го роду [1-3].

Аналіз публікацій показує, що розрахунки теплонапруженого стану поршнів здебільше виконують для 3D-моделей з використанням вісесиметричних ГУ 3-го роду [1, 3]. Однак, тепловий стан поршня визначається його складною конфігурацією, нерівномірністю теплопідведення до поверхні КЗ [4-6] та тепловідведення у гільзу циліндрів (ГЦ) [7, 8].

На сьогодні не вирішена задача дослідження теплонапруженого стану поршня з урахуванням

нерівномірності тепловідведення від нього у ГЦ. Тому метою даної роботи є отримання ГУ поршня, які враховують нерівномірне тепловідведення у ГЦ.

Для досягнення поставленої мети в роботі було виконане коригування ГУ 3-го роду поршня в зоні кілець з урахуванням значень температури ГЦ. Об'єктом дослідження було обрано поршень з КЗ відкритого типу швидкохідного дизеля 4ЧН12/14. Рівень форсування двигуна прийнято 18,5 та 25 кВт/л. Матеріал поршня – сплав АЛ25.

Спираючись на дані температурного стану ГЦ при форсуванні двигуна до 18,5 кВт/л [8], нами були отримані відповідні несиметричні ГУ 3-го роду. Схема завдання ГУ подана на рис. 1, приклад отриманих на даному етапі робіт ГУ, як коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  та температури середовища  $t_{CP}$ , наведені в табл. 1. З рис. 1 видно, що зони, позначені з верхніми індексами, визначають несиметричні ГУ.

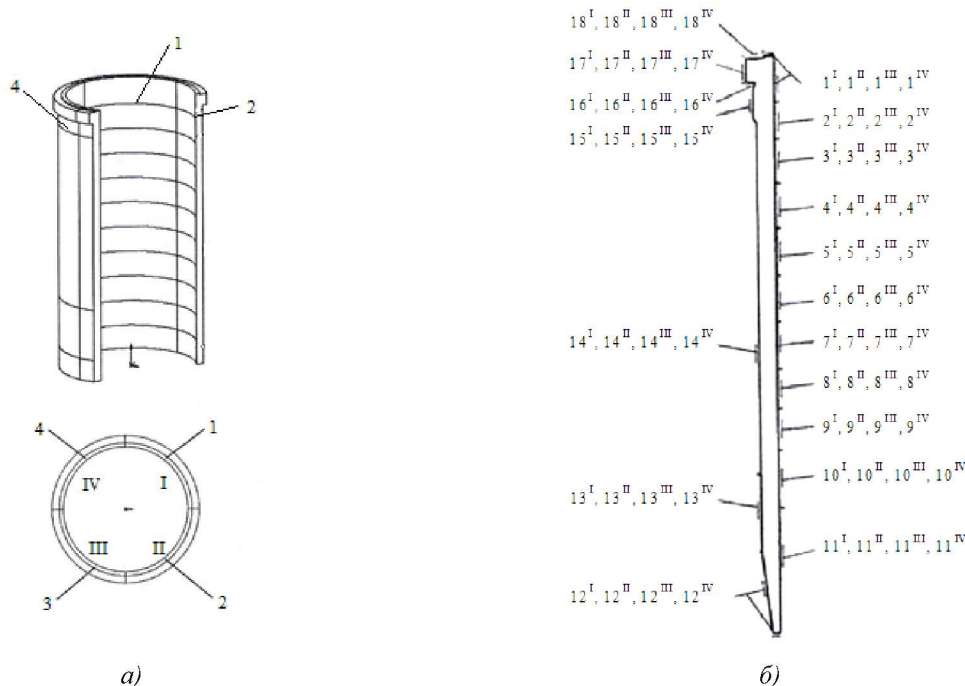


Рис. 1. Схема завдання ГУ 3-го роду гільзи циліндрів:

а – розташування ділянок для завдання несиметричних ГУ(I-IV) та контрольних точок верхнього поясу (1-4); б – переріз з визначеними номерами ділянок

Таблиця 1. ГУ 3-го роду ГЦ дизеля 4ЧН 12/14 при рівні форсування 18,5 кВт/л

№ ді- ля- нки	$t_{CP},$ °C	$\alpha,$ Вт/м <sup>2</sup>	№ ді- ля- нки	$t_{CP},$ °C	$\alpha,$ Вт/м <sup>2</sup>	№ ді- ля- нки	$t_{CP},$ °C	$\alpha,$ Вт/м <sup>2</sup>
1 <sup>I</sup>	900	450	7 <sup>I</sup>	360	310	13 <sup>I</sup>	90	300
1 <sup>II</sup>	765	383	7 <sup>II</sup>	360	310	13 <sup>II</sup>	90	300
1 <sup>III</sup>	765	383	7 <sup>III</sup>	360	310	13 <sup>III</sup>	90	300
1 <sup>IV</sup>	765	383	7 <sup>IV</sup>	360	310	13 <sup>IV</sup>	90	300
2 <sup>I</sup>	810	385	8 <sup>I</sup>	270	295	14 <sup>I</sup>	90	11000
2 <sup>II</sup>	688	327	8 <sup>II</sup>	270	295	14 <sup>II</sup>	90	11000
2 <sup>III</sup>	688	327	8 <sup>III</sup>	270	295	14 <sup>III</sup>	90	11000
2 <sup>IV</sup>	688	327	8 <sup>IV</sup>	270	295	14 <sup>IV</sup>	90	11000
3 <sup>I</sup>	720	370	9 <sup>I</sup>	180	280	15 <sup>I</sup>	100	6000
3 <sup>II</sup>	612	315	9 <sup>II</sup>	180	280	15 <sup>II</sup>	100	6000
3 <sup>III</sup>	612	315	9 <sup>III</sup>	180	280	15 <sup>III</sup>	100	6000
3 <sup>IV</sup>	612	315	9 <sup>IV</sup>	180	280	15 <sup>IV</sup>	100	6000
4 <sup>I</sup>	630	355	10 <sup>I</sup>	150	280	16 <sup>I</sup>	125	15000
4 <sup>II</sup>	535	302	10 <sup>II</sup>	150	280	16 <sup>II</sup>	125	15000
4 <sup>III</sup>	535	302	10 <sup>III</sup>	150	280	16 <sup>III</sup>	125	15000
4 <sup>IV</sup>	535	302	10 <sup>IV</sup>	150	280	16 <sup>IV</sup>	125	15000
5 <sup>I</sup>	540	340	11 <sup>I</sup>	100	250	17 <sup>I</sup>	125	160
5 <sup>II</sup>	459	289	11 <sup>II</sup>	100	250	17 <sup>II</sup>	125	160
5 <sup>III</sup>	459	289	11 <sup>III</sup>	100	250	17 <sup>III</sup>	125	160
5 <sup>IV</sup>	459	289	11 <sup>IV</sup>	100	250	17 <sup>IV</sup>	125	160
6 <sup>I</sup>	455	315	12 <sup>I</sup>	85	500	18 <sup>I</sup>	160	200
6 <sup>II</sup>	387	268	12 <sup>II</sup>	85	500	18 <sup>II</sup>	160	200
6 <sup>III</sup>	387	268	12 <sup>III</sup>	85	500	18 <sup>III</sup>	160	200
6 <sup>IV</sup>	387	268	12 <sup>IV</sup>	85	500	18 <sup>IV</sup>	160	200

В табл. 2 наведено температури чотирьох контрольних точок верхнього поясу ГЦ згідно схеми рис. 1а за експериментальними даними  $t_{ЕКСП}$  [8], а також за результатами розрахунку  $t_{РОЗР}$  при використанні отриманих нами несиметричних ГУ. Видно, що різниця температур в околотовому напрямі ГЦ за експериментальними даними складає 48°С, а використаними несиметричними ГУ – 23°С. Вказане говорить про виконання подальших досліджень, як оціночних.

Таблиця 2. Температури у контрольних точках ГЦ

№ контрольної точки	$t_{ЕКСП},$ °C	$t_{РОЗР},$ °C
1	164	165
2	145	158
3	180	181
4	132	158

Отримане несиметричне температурне поле ГЦ використане для коригування ГУ поршня. Відомою є модель ГУ, відповідно до якої температура середовища в зоні кілець для поршня з відкритою КЗ визначається за емпіричною залежністю [9]:

$$t_{ПК} = K_T \cdot (0,725 + 0,0149 N_L), \quad (1)$$

де  $N_L$  – літрова потужність двигуна, кВт/л;  $K_T$  – емпіричний коефіцієнт, що залежить від умов теплообміну між поршнем і ГЦ, град/(кВт/л). Для вісесиметричних ГУ його значення встановлено на основі аналізу 13 конструктивних варіантів поршнів і двигунів при різних їх навантаженнях [9]. За даними [9] коефіцієнт  $K_T$  приймає значення від 200 до 280 град/(кВт/л).

Виходячи з усереднених в повздовжньому напрямі зон i-iv величин температур внутрішньої поверхні ГЦ, з рівняння (1) можна отримати наступні несиметричні значення  $K_T$  в околотовому напрямі поршня:  $K_T^I = 217$  град/(кВт/л);  $K_T^{II} = 215$  град/(кВт/л);  $K_T^{III} = 233$  град/(кВт/л);  $K_T^{IV} = 215$  град/(кВт/л).

З урахуванням отриманих коефіцієнтів  $K_T^{I-IV}$ , було виконано коригування ГУ 3-го роду [8] в зоні першого поршневого кільця, за якими здійснено розрахунок теплонапруженого стану поршня. Схема завдання ГУ 3-го роду поршня наведена на рис. 2. Отримані ГУ для рівня форсування 18,5 кВт/л наведені у табл. 3. Тут нерівномірне тепловідведення від поршня враховано на ділянці 13.

За симетричними [8] та наведеними в табл. 3 несиметричними ГУ було здійснено аналіз температурного стану поршня. Контрольні точки, за якими здійснено порівняння температурного стану, наведено на рис. 2. Результати розрахунку подано у табл. 4.

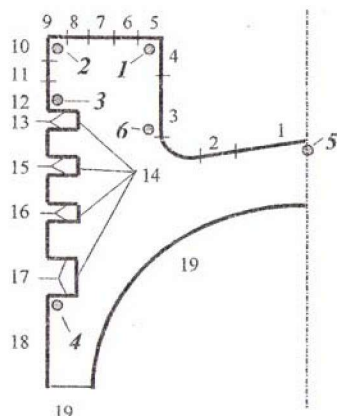


Рис.2. Схема завдання ГУ 3-го роду поршня та контрольні точки аналізу його температурного стану

Табл. 3. Кориговані ГУ 3-го роду задачі теплопровідності поршня з відкритою КЗ дизеля 4ЧН12/14 при рівні форсування 18,5 кВт/л

№ ділянки	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$t_{CP}$ , °С	№ ділянки	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$t_{CP}$ , °С
1	300	950	12	200	400
2	450	950	13 <sup>I</sup>	16000	255
3	550	950	13 <sup>II</sup>	16000	236
4	500	950	13 <sup>III</sup>	16000	238
5	450	950	13 <sup>IV</sup>	16000	236
6	400	950	14	200	250
7	350	950	15	11000	200
8	300	800	16	6000	140
9	250	700	17	3000	140
10	200	600	18	500	120
11	200	500	19	500	90

Аналіз даних табл. 4 дозволяє встановити, що мають місце відмінності у значеннях температур поршня в аналогічних точках для симетричних та несиметричних ГУ. На кромці КЗ (точка 1) ця відмінність складає не менше, ніж 4°С, для зони верхнього поршневого кільця (точка 3) – не менше 8°С. При форсуванні двигуна до 25 кВт/л ці відмінності є аналогічними.

За отриманими даними було виконано прогнозування ресурсної міцності (РМ) кромки КЗ поршня з використанням методики, наведеної у [9]. Встановлено, що величина накопичених пошкоджень для рівня форсування 18,5 кВт/л для варіанту розрахунку з симетричними ГУ складає 0,136, а для варіанту з несиметричними ГУ – 0,178. Для рівня форсування 25 кВт/л величини накопичених пошкоджень становлять відповідно 0,87 та 1,059.

Таким чином видно, що при форсуванні двигуна до 25 кВт/л величина накопичених пошкоджень, яка розрахована для варіанту з вісесиметричними умовами, свідчить про працездатність поршня. Водночас для варіанту з несиметричними умовами розрахунки вказують на руйнування кромки КЗ.

Таблиця 4. Значення температур у контрольних точках поршня

Симетричні ГУ		Несиметричні ГУ	
№ контрольної точки	$t$ , °С	№ контрольної точки	$t$ , °С
1	309	1 <sup>I</sup>	313
		1 <sup>II</sup>	308
		1 <sup>III</sup>	309
		1 <sup>IV</sup>	308
2	273	2 <sup>I</sup>	279
		2 <sup>II</sup>	274
		2 <sup>III</sup>	273
		2 <sup>IV</sup>	273
3	243	3 <sup>I</sup>	251
		3 <sup>II</sup>	243
		3 <sup>III</sup>	243
		3 <sup>IV</sup>	243
4	166	4 <sup>I</sup>	175
		4 <sup>II</sup>	166
		4 <sup>III</sup>	175
		4 <sup>IV</sup>	166
5	269	5 <sup>I</sup>	269
		5 <sup>II</sup>	269
		5 <sup>III</sup>	269
		5 <sup>IV</sup>	269
6	267	6 <sup>I</sup>	270
		6 <sup>II</sup>	267
		6 <sup>III</sup>	267
		6 <sup>IV</sup>	266

У цілому за отриманими результатами можна зробити висновок про необхідність урахування околлової нерівномірності ГУ поршня в зоні поршневих кілець, що є особливо важливим для урахування РМ поршнів при застосуванні концепції функціонування деталей КЗ на межі міцності.

Подальший напрям робіт пов'язаний з уточненням ГУ по ГЦ та з урахуванням впливу на РМ нерівномірності теплопідведення до поршня, сумісної дії нерівномірності теплопідведення та тепловідведення у гільзу.

**Список літератури:**

1. Процессы в перспективных дизелях / [А.Ф. Шеховцов, Ф.И. Абрамчук, В.И. Крутов и др.]; под. ред. А.Ф. Шеховцова. – Х.: Изд-во "Основа", 1992. – 352с. 2. Левтеров А.М. Расчетный анализ стационарных термоупругих напряжений гильзы цилиндра быстроходного дизеля / А.М. Левтеров, А.Н. Авраменко // Автомобильный транспорт. – 2008. – Вып. 23. – С.132-134. 3. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / [Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко, Н.Ф. Разлейцев, Е.И. Третьяк, А.Ф. Шеховцов, Н.К.Шоколов]; под. ред. А.Ф. Шеховцова. – К:Техника, 1992. – 272с. 4. Кавтарадзе Р. 3. Расчетно-экспериментальное исследование локального теплообмена на основе днище поршня дизеля, конвертированного в газожидкостный двигатель / Р. 3. Кавтарадзе, А. И. Гайворонский, А. А. Зеленцов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". – 2009. – №2. С. 45-57. 5. Никишин В.Н. Исследование неравномерности температурного поля гильзы цилиндра и поршня автомобильного дизеля [Электронный ресурс] / В.Н. Никишин // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, организация: Онлайн-научно-технический журнал. – 2006. – №7. – 5с. – Режим доступа до журн.: <http://kamri.ru/sets>. 6. Белозуб А.В. Исследование температурного поля поршня / А.В. Белозуб, А.А. Зотов, А.Г. Щербина, Ю.А. Гусев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2002. – № 31. С. 120-123. 7. Лоцаков П.А. Результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния оребрения охлаждаемой поверхности гильзы цилиндров на температурное состояние гильз и поршней дизелей ЯМЗ / П.А. Лоцаков // Двигателестроение. – 2000. - № 1. – С. 57-58. 8. Шеховцов А.Ф. Тепловое и напряженно-деформированное состояние гильзы цилиндра быстроходного дизеля при нестационарных нагрузках / А.Ф. Шеховцов, П.П. Гонтаровский, Ф.И. Абрамчук, А.М. Левтеров // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: ХПИ. – 1993. – Вып.54. – С. 9-22. 9. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності. Монографія. / В.О. Пильов – Видавничий центр НТУ „ХПІ”, 2001. – 332 с.

УДК 621.438

**А.И. Тарасенко, канд. техн. наук**

## КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В МАЛООБОРОТНОМ ДИЗЕЛЕ ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

### Введение

При определении параметров крутильных колебаний рассматриваются два аспекта этого вопроса: стационарные колебания и переходные процессы.

Стационарные колебания являются важной частью расчетов, результаты которых должны быть согласованы с Классификационными обществами, например с Регистром.

Переходные процессы и крутильные колебания, им сопутствующие, исследуются при решении специальных задач. Начальными условиями для расчетов переходных процессов являются параметры стационарных.

В работе [3] рассмотрена крутильная система, состоящая, как из участков с распределенными параметрами, так и из невесомых участков без распределенных параметров. Данная статья является конкретизацией результатов работы [3].

### Формулирование проблемы

Требуется на основе решения волнового уравнения согласно методике, изложенной в [3], получить параметры стационарных колебаний системы дизель-валопровод-гребной винт. Сравнить результаты с параметрами, полученными при расчетах по другим методикам. Исследовать влияние учета распределенных параметров путем сравни-

тельного анализа эквивалентных систем с дискретными и распределенными параметрами.

**Цель работы** – показать достоверность результатов, получаемых по методике [3] и подтвердить возможность ее применения для инженерных расчетов. Указать способ использования экспериментальных данных, полученных при применении других методик в предлагаемой.

Углы поворота сечений крутильной системы, рассматриваемой в виде  $k_1 + 1$  маховиков, соединенных упругими валами, весовыми или невесовыми, описаны следующим уравнением [3]

$$\varphi_j = f_j(t) \cdot Z_j(y), \quad (1)$$

где  $j$  – номер, рассматриваемой формы колебаний;  $f_j(t)$  – функция времени для формы с номером  $j$ ;  $Z_j(y)$  – форма колебаний с номером  $j$  – функция от координаты сечения  $y$ .

Крутильная система, содержащая  $k_1 + 1$  маховик, содержит  $k_1$  участок. Каждый участок, начинается с маховика. Гребной винт рассматривается как маховик с номером  $k_1 + 1$ .

Для участка с номером  $k$  можно записать